PARTE III

ANALISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS E PAREDES EXTERIORES

CAPÍTULO 7

OBJECTIVOS E METODOLOGIA ADOPTADA

7.1. Objectivos

Nesta parte, pretende-se realizar uma análise comparativa entre várias soluções construtivas existentes ao nível dos pavimentos e paredes exteriores. Este estudo visa avaliar a sustentabilidade de cada solução construtiva, através da sua comparação com a solução mais corrente nos edifícios em Portugal.

Em primeiro lugar será desenvolvida uma metodologia adequada à análise comparativa da sustentabilidade de soluções construtivas. A metodologia desenvolvida, ainda que simples, por englobar o estudo de um reduzido número de parâmetros, poderá constituir uma base para futuras investigações que abordem o desenvolvimento de sistemas mais complexos de análise da sustentabilidade de soluções construtivas e/ou de sistemas de avaliação da sustentabilidade dos edifícios, adequados às soluções construtivas portuguesas.

Por fim, serão apresentados dois quadros resumo, um para os pavimentos e outro para as paredes exteriores, onde estão apresentados os resultados obtidos para cada uma das soluções construtivas analisadas. Estes resultados poderão servir de apoio aos projectistas na selecção das tecnologias construtivas a integrar num edifício, de modo a que os desígnios por uma construção mais sustentável sejam cada vez mais uma realidade.

7.2. Metodologia adoptada

Na avaliação da sustentabilidade podem ser abordados vários parâmetros que nem sempre estão correlacionados entre si e que não se expressam na mesma grandeza. Por outro lado, o modo como cada um dos parâmetros influencia a sustentabilidade não é consensual nem imutável ao longo do tempo. Assim, é difícil expressar a sustentabilidade em termos absolutos, através de um indicador que integre todos os parâmetros analisados e que permita a classificação do objecto analisado, relativamente à sua sustentabilidade. Por exemplo, uma solução que apresente boa performance ambiental e ao mesmo tempo não cumpra as exigências funcionais mínimas, não pode ser considerada sustentável. Por outro lado, uma solução com bom desempenho ambiental e que cumpra todas as exigências funcionais, mas em que o custo de construção ultrapassa largamente o custo da solução construtiva convencional, não poderá ser considerada sustentável, pois o seu custo proibitivo constitui uma barreira à sua implementação.

A sustentabilidade é assim uma questão relativa, que deve ser avaliada comparativamente e relativamente à prática corrente – a solução de referência – num determinado país/local. Deste modo, é possível verificar se, ao nível de cada parâmetro analisado, a solução em estudo é melhor ou pior do que a solução de referência. O patamar mínimo de sustentabilidade deve corresponder, numa primeira fase, à solução com mais expressão no mercado, devendo ser ajustado ao longo do tempo em função do desenvolvimento tecnológico. A solução mais sustentável depende daquilo que o limite tecnológico pode proporcionar em cada momento.

Em países onde a sustentabilidade da Construção é uma temática relevante encontram-se a ser aplicados e/ou em fase de desenvolvimento, alguns sistemas e ferramentas de avaliação da sustentabilidade. Desses destacam-se os seguintes:

- **Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM)**, desenvolvido no Reino Unido (BRE, 2004);
- **Leadership in Energy & Environmental Design (LEED)**, desenvolvido nos Estados Unidos (USGBC, 2004);
- **Green Building Challenge (GBTool)**, ferramenta desenvolvida no âmbito de um desafio internacional com vista à promoção e avaliação de projectos sustentáveis para edifícios (Greenbuilding, 2004).

Estes sistemas encontram-se sobretudo orientados para a avaliação do desempenho ambiental edifícios, numa perspectiva global, em que as principais áreas de verificação se encontram descritas no quadro 7.1. A sustentabilidade das soluções construtivas é um dos parâmetros considerados na avaliação da sustentabilidade global dos edifícios. A aplicação destes sistemas de avaliação pressupõe a utilização de soluções construtivas que constam nas suas bases de dados ou o conhecimento prévio das características de cada solução, pelo que a sua aplicação em Portugal ou em outros países que não o de origem, nem sempre é possível devido à especificidade das soluções construtivas. Será assim necessário adaptar estes sistemas às soluções construtivas que se integram nos edifícios portugueses, em que o primeiro passo consistirá em desenvolver bases de dados que reúnam as principais características das soluções construtivas.

Quadro 7.1 – Principais áreas de verificação nos sistemas mais relevantes de avaliação da sustentabilidade dos edifícios (fonte: Pinheiro, 2003)

	Sistemas de avaliação		
	BREEAM	**LEED (2.0)**	**GBTool (1.8)**
Principais áreas de verificação	• Energia; • Transporte; • Poluição; • Materiais; • Água; • Ecologia e uso do solo; • Saúde e bem-estar	• Sustentabilidade dos locais; • Eficiência de água; • Energia e atmosfera; • Materiais e recursos; • Qualidade do ar interior; • Inovação e desenho.	• Consumo de recursos; • Cargas ambientais; • Qualidade do ar interior; • Qualidade do serviço; • Economia; • Gestão de pré operações; • Transporte.

Como já se referiu, os sistemas de avaliação da sustentabilidade existentes não são adequados à avaliação das soluções construtivas. Desenvolve-se, assim, uma metodologia específica para a análise de soluções construtivas que será aplicada a algumas soluções convencionais e não convencionais na Indústria da Construção portuguesa. Os resultados obtidos são passíveis de ser utilizados na aplicação de sistemas de avaliação da sustentabilidade global de edifícios.

Neste trabalho, propõem-se que a avaliação da sustentabilidade das soluções construtivas se realize através de uma metodologia de análise relativa, cuja base de comparação é, para cada elemento construtivo, a solução construtiva mais aplicada – solução de referência. Esta metodologia desenvolvida especificamente no âmbito deste trabalho, a que foi atribuída a denominação de **Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas** (**MARS-SC**), aborda três grupos de parâmetros: **ambientais**, **funcionais** e **económicos**.

Depois de se estudarem, dentro de cada grupo, os parâmetros pretendidos, a comparação entre as diversas soluções construtivas é realizada através de **índices de comparação**. Estes índices expressam a relação de grandeza existente entre um determinado parâmetro na solução em estudo e o mesmo parâmetro na solução de referência, o que permite verificar se, relativamente a cada parâmetro analisado, a solução construtiva em estudo é melhor ou pior do que a solução de referência.

Para que o leitor tenha uma melhor percepção das diferenças existentes entre as diversas soluções construtivas, ao nível de cada parâmetro, os índices são representados graficamente.

Cada índice em estudo é representado por um vector com o comprimento proporcional ao valor do índice. Os vectores terão origem no mesmo ponto e a união dos pontos, correspondentes à outra extremidade, forma uma figura geométrica com o número de lados correspondente ao número de índices que são objecto de análise em simultâneo. À representação gráfica dos índices atribuiu-se a denominação de **Perfil Sustentável**.

O número de parâmetros focados dentro de cada grupo de parâmetros poderá ser ajustado em função do grau de complexidade que se pretenda para a avaliação, das características próprias de cada solução construtiva, das exigências funcionais que se pretenda que a solução satisfaça e dos dados disponíveis. Em cada grupo poder-se-ão abordar, entre outros, os parâmetros apresentados no quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Exemplos de parâmetros que podem ser abordados na Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC)

PARÂMETROS		
Ambientais	**Funcionais**	**Económicos**
• Massa; • Energia primária incorporada (PEC); • Quantidade incorporada de matéria-prima reciclada; • Potencial de reutilização; • Potencial de reciclagem; • Reservas remanescentes de matéria-prima; • Distância média de transporte dos materiais/ produtos necessários; • Potencial de aquecimento global (PAG); • Quantidade de água incorporada.	• Isolamento sonoro a sons de condução aérea; • Isolamento sonoro a sons de percussão; • Isolamento térmico; • Durabilidade; • Comportamento ao fogo; • Construtibilidade; • Flexibilidade; • Inovação e desenho.	• Custo de construção; • Custo de manutenção; • Custo de reabilitação; • Custo de desmantelamento/ demolição; • Valor venal; • Custo do tratamento para devolução ao ambiente natural.

Na aplicação da MARS-SC às soluções construtivas analisadas neste trabalho são abordados **dois parâmetros ambientais**, **três funcionais** e **um económico**.

Ao nível dos parâmetros **ambientais** são analisadas a massa da solução construtiva e a energia primária incorporada por unidade de superfície. No estudo dos parâmetros **funcionais** abordam--se o comportamento acústico e o isolamento térmico de cada solução construtiva e, no caso das paredes, o espaço ocupado. O comportamento acústico das soluções construtivas é caracterizado através do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($D_{n,\,w}$) e nos elementos horizontais – pavimentos – é também considerado o índice de isolamento sonoro a sons de percussão ($L'_{n,w}$). O isolamento térmico das soluções construtivas é caracterizado através do coeficiente global de transmissão térmica (U). O espaço ocupado pelas paredes é caracterizado através da sua largura total. No caso das paredes, a largura das paredes é um parâmetro importante, na medida em que influencia a área útil dos edifícios. Ao nível dos parâmetros **económicos** é abordado o custo de construção.

Para os pavimentos são determinados, através das expressões apresentadas no quadro 7.3, os índices de massa (I_m), de energia primária incorporada – PEC (I_{PEC}), de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($I_{Dn,w}$), de isolamento sonoro a sons de percussão ($I_{L'n,w}$), de transmissão térmica média (I_{Umed}) e de custo de construção (I_{cc}).

Quadro 7.3 – Índices de comparação utilizados na análise comparativa das soluções construtivas

i) Índice de peso ($\mathbf{I_m}$)	ii) Índice de energia primária consumida ($\mathbf{I_{PEC}}$)
$$I_m = \frac{m_{estudo}}{m_{referência}}$$ com, m_{estudo} –Massa da solução em estudo; $m_{referência}$ – Massa da solução de referência.	$$I_{PEC} = \frac{PEC_{estudo}}{PEC_{referência}}$$ com, PEC_{estudo} – Energia primária incorporada da solução em estudo; $PEC_{referência}$ – Energia primária incorporada da solução de referência.
iii) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea ($\mathbf{I_{Dn,w}}$)	**iv) Índice de isolamento sons de percussão ($\mathbf{I_{L'n,w}}$)**
$$I_{Dn,w} = \frac{Dn,w_{referência}}{Dn,w_{estudo}}$$ com, $Dn,w_{referência}$ – Isolamento a sons de condução aérea da solução de referência; Dn,w_{estudo} – Isolamento a sons de condução aérea da solução em estudo.	$$I_{L'n,w} = \frac{L'n,w_{estudo}}{L'n,w_{referência}}$$ com, $L'n,w_{estudo}$ – Isolamento a sons de percussão da solução em estudo; $L'n,w_{referência}$ – Isolamento a sons de percussão da solução de referência.

Quadro 7.3 (cont.) – Índices de comparação utilizados na análise comparativa das soluções construtivas

v) Índice de transmissão térmica média ($\mathbf{I_{Umed}}$)	vi) Índice de custo de construção ($\mathbf{I_{cc}}$)
$$I_{Umed} = \frac{Umed_{estudo}}{Umed_{referência}}$$ com, $Umed_{estudo}$ – Coeficiente global médio de transmissão térmica da solução em estudo; $Umed_{referência}$ – Coeficiente global médio de transmissão térmica da solução de referência.	$$I_{cc} = \frac{cc_{estudo}}{cc_{referência}}$$ com, cc_{estudo} – Custo de construção da solução em estudo; $cc_{referência}$ – Custo de construção da solução de referência.

Para as paredes, o índice de isolamento a sons de percussão é substituído pelo índice de espaço ocupado (I_{eo}) – que pretende traduzir a relação existente ao nível da espessura total das paredes – e o índice de transmissão térmica média pelo índice de transmissão térmica (I_U) – neste elemento não se torna necessário averiguar o isolamento térmico da solução para as duas direcções do fluxo de calor: ascendente (Inverno) e descendente (Verão). No quadro 7.4 apresentam-se as expressões utilizadas na quantificação desses índices.

Quadro 7.4 – Índices de comparação utilizados na análise comparativa das soluções construtivas (cont.)

vii) Índice de transmissão térmica ($\mathbf{I_U}$)	viii) Índice de espaço ocupado ($\mathbf{I_{eo}}$)
$$I_U = \frac{U_{estudo}}{U_{referência}}$$ com, U_{estudo} – Coeficiente global de transmissão térmica da solução em estudo; $U_{referência}$ – Coeficiente global de transmissão térmica da solução de referência.	$$I_{eo} = \frac{eo_{estudo}}{eo_{referência}}$$ com, eo_{estudo} – Espaço ocupado pela solução em estudo; $eo_{referência}$ – Espaço ocupado pela solução de referência.

Calculados os índices de comparação é possível avaliar, ao nível de cada parâmetro, se a solução construtiva em estudo é melhor ou pior do que a solução construtiva de referência (quadro 7.5).

Quadro 7.5 – Avaliação das soluções construtivas, relativamente à solução de referência, através dos índices de comparação

Valor do índice	Avaliação
< 1	Solução em estudo melhor do que a solução de referência
≈ 1	Solução em estudo idêntica à solução de referência
> 1	Solução em estudo pior do que a solução de referência

Os seis índices são, por fim, representados em vectores, cujo comprimento expressa o valor do índice. Os vectores na solução de referência terão desenvolvimento unitário, e a figura formada – o **perfil sustentável** – pela união dos pontos correspondentes a uma das extremidades dos vectores será, atendendo ao número de parâmetros analisados, hexagonal (fig. 7.1). A título de exemplo, no caso dos pavimentos e numa situação semelhante à da figura 7.2, a solução em estudo será, a todos os níveis, melhor do que a solução de referência, pelo que, se poderá considerar mais sustentável, atendendo aos parâmetros analisados. Quanto menor a área da figura geométrica formada pela união dos pontos relativos a cada índice, mais sustentável será a solução.

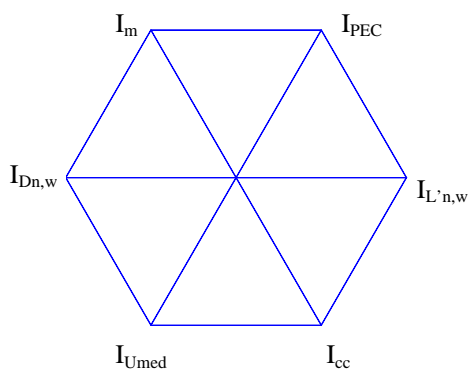



Figura 7.1 – Perfil sustentável da solução de referência

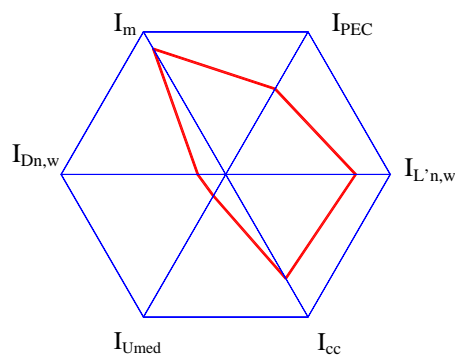



Figura 7.2 – Representação perfil sustentável da solução em estudo sobre o perfil sustentável da solução de referência

A metodologia adoptada na avaliação comparativa das soluções construtivas encontra-se esquematizada na figura 7.3.

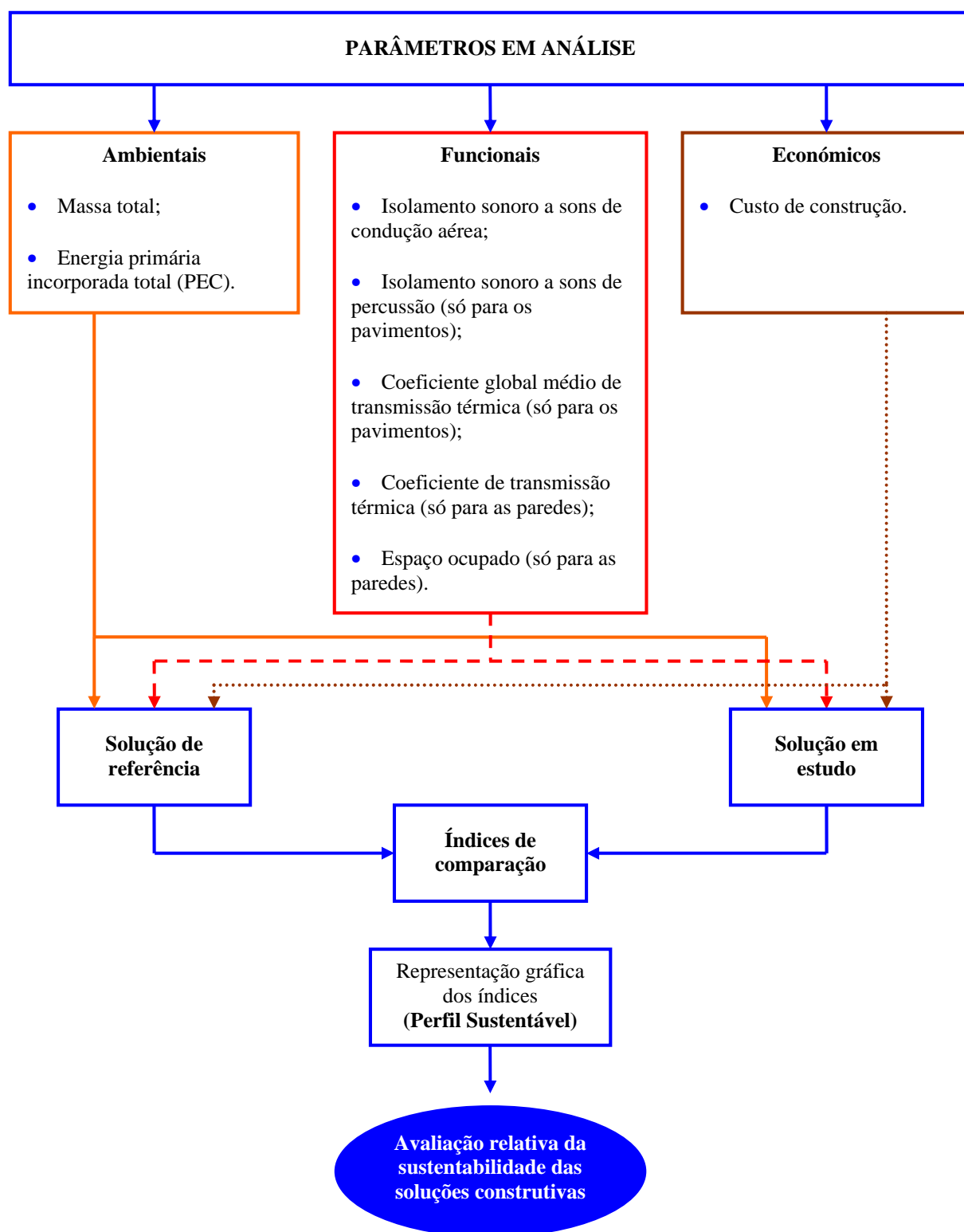



Figura 7.3 – Representação esquemática da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC)

Seguidamente, realiza-se uma descrição sucinta do método adoptado na quantificação de cada um dos parâmetros.

7.2.1. Parâmetros ambientais

Como já foi referido no capítulo 3, a performance ambiental de uma solução construtiva pode ser caracterizada através de vários parâmetros: massa da solução, energia primária incorporada, potencial de aquecimento global, potencial de reciclagem, potencial de reutilização, toxidade dos materiais utilizados, quantidade de água utilizada na sua produção, etc.

A quantificação de alguns dos parâmetros mencionados nem sempre é fácil. Por exemplo, o potencial de reciclagem e o potencial de reutilização são parâmetros difíceis de expressar numericamente. Estes parâmetros dependem de alguns factores como o estado de conservação dos materiais ou produtos que compõem a solução construtiva no final do ciclo da sua vida útil, das soluções arquitectónicas e construtivas correntes numa determinada época, do modo como os produtos ou materiais de construção se encontram ligados entre si, do estágio de desenvolvimento tecnológico ao nível das soluções de reciclagem – o que hoje não é possível reciclar, talvez no futuro o venha a ser –, etc. Também a toxidade dos materiais é de difícil avaliação, pois nem sempre é possível obter as *Material Safety Data Sheets* (MSDS) dos materiais de construção com a identificação dos compostos químicos utilizados directa e/ou indirectamente na sua produção.

Atendendo à dificuldade que existe na determinação de alguns dos parâmetros ambientais das soluções construtivas, são apenas abordados aqueles cuja quantificação é menos complexa e que conduzem a resultados mais fidedignos: a **energia primária incorporada** (PEC) e o **peso das soluções construtivas**.

Ao nível da energia primária incorporada (PEC), já existem algumas publicações que abordam esta temática. No entanto, não existem dados concretos para Portugal, pelo que os valores que constam nessas publicações estão relacionados com as condições particulares da Indústria da Construção dos países de origem que, na maior parte das vezes, são muito distintas das do mercado português. Atendendo ao relativo atraso tecnológico da indústria portuguesa, os valores da energia incorporada nos materiais de construção para o mercado português poderão ser superiores aos valores apresentados. No entanto, optou-se por abordar este parâmetro, pois os valores apesar de distintos no mercado português devem, no entanto, apresentar as mesmas relações de grandeza, o que vai ao encontro do objectivo traçado para o presente estudo, onde se pretende realizar uma análise comparativa entre diversas soluções construtivas. A quantificação do peso das soluções construtivas é importante, pois a maior parte dos parâmetros enunciados estão correlacionados com este parâmetro.

Quanto menor for o peso e a PEC, menor será a contribuição da solução construtiva na delapidação dos recursos naturais e nos consumos energéticos associados à Indústria da Construção.

O quadro 7.6 apresenta a massa volúmica aparente, a condutibilidade térmica (?) e a energia primária incorporada (PEC), associados a cada material/produto utilizado na materialização das diversas soluções construtivas estudadas.

Quadro 7.6 – Massa volúmica aparente média, condutibilidade térmica (?) e energia primária incorporada (PEC), associados a cada material/produto de construção (fontes: Santos *et al*, 1990; Berge, 2000 e outras)

Material/produto	**Massa volúmica aparente média** (kg/m³)	**Condutibilidade térmica - ?** (W/m.ºC)	**Energia primária incorporada – PEC** (kWh/kg)
Aço (100% reciclado)	7780	52,00	2,77
Aglomerado de fibras de madeira (OSB)	925	0,012	4,17
Aglomerado negro de cortiça	140	0,045	1,11
Argamassa de assentamento	1950	1,15	0,28
Argamassa de reboco	1950	1,15	0,28
Betão armado	2500	1,75	-
Betão celular autoclavado	720	0,16	1,11
Betão de argila expandida	750	0,25	1,11
Betão simples	2400	1,75	0,28
Blocos cerâmicos	-	-	0,83
Gesso cartonado	900	0,35	1,39
Lã de rocha	40	0,040	4,45
Madeira	350	0,12	0,83
Pedra (em alvenaria)	2600[1]	3,00[1]	0,03
Poliestireno expandido extrudido (XPS)	32,5	0,035	20,00
Poliestireno expandido moldado (EPS)	20	0,040	20,00
Polietileno	940	0,40	18,60
Revestimento cerâmico	2000	-	2,22

7.2.2. Parâmetros funcionais

7.2.2.1. Comportamento acústico

1) Conceitos gerais

O comportamento acústico de um elemento de separação é um factor que deve influenciar a opção por uma determinada solução construtiva.

[1] Inclui argamassa nas juntas de assentamento.

O aumento do número de fontes ruidosas no exterior e no interior dos edifícios aliado ao facto do isolamento acústico das soluções construtivas não ter acompanhado este acréscimo, tem conduzido à degradação, em alguns casos bastante acentuada, da qualidade de vida das populações. Esta degradação tem-se repercutido não só na diminuição do conforto acústico dos espaços habitados como na deterioração da saúde dos seus ocupantes, estando associada ao aparecimento de problemas psíquicos (stress e irritabilidade), fisiológicos (perturbação do sono) e auditivos (desde a fadiga até ao trauma) (Mateus, *et al*, 1999).

A aplicação da acústica no estudo do comportamento dos edifícios é geralmente realizada a três diferentes níveis (APICER, 98):

- **Estudo da propagação de sons entre dois espaços limitados por uma separação física**, geralmente denominado por estudo do isolamento acústico e que depende essencialmente da massa e da estanquidade dos elementos que separam os dois locais;

- **Estudo da propagação do som no interior de um espaço fechado**, denominado de correcção acústica ou acondicionamento acústico do local. Este estudo visa assegurar que os espaços fechados apresentem características acústicas compatíveis com o tipo de actividade que se pretende desenvolver no seu interior. Este comportamento depende essencialmente do volume do espaço, do tipo de revestimentos interiores e do tipo de recheio previstos;

- **O estudo da propagação do som por via sólida**. Os choques ou outras acções mecânicas aplicadas directamente nos elementos de construção produzem sons que são conhecidos por sons ou ruídos de percussão. Estes sons podem ser provocados, por exemplo, por marteladas em paredes, arrastamento de móveis, passos em pavimentos – principalmente quando se utilizam saltos duros –, etc. Ao contrário dos ruídos de condução aérea, que em geral só afectam os locais mais próximos da fonte de ruído, os ruídos de percussão podem estender-se a todo o edifício.

As soluções construtivas de pavimentos e paredes, como elementos separadores entre espaços, são responsáveis por assegurar a qualidade de vida dos utilizadores neste domínio, devendo manter os níveis sonoros nos espaços habitados dentro de valores aceitáveis e regulamentares. Assim, para cada solução construtiva vai-se estudar a sua capacidade em atenuar o nível sonoro das ondas sonoras que a atravessam. Nos elementos verticais, tendo em conta a baixa probabilidade de serem solicitados por choques ou outras acções mecânicas, a forma de comportamento acústico que mais importa destacar prende-se com o isolamento sonoro a sons de condução aérea. Nos elementos horizontais será também avaliado o comportamento a sons de percussão.

A relação das soluções construtivas com o acondicionamento acústico dos espaços é mínima, pois depende essencialmente, como já foi referido, do volume do espaço e dos tipos de revestimentos utilizados, pelo que este parâmetro não será abordado.

O isolamento a sons de condução área é caracterizado através do índice de isolamento sonoro a sons aéreos ($D_{n,w}$) e o isolamento sonoro a sons de percussão através do índice de isolamento a

sons de percussão ($L'_{n,w}$). De seguida explica-se sucintamente as metodologias seguidas para a quantificação dos índices de isolamento sonoro.

1) Índice de isolamento a sons aéreos ($D_{n,w}$)

Da energia sonora que incide num elemento de separação, uma parte é dissipada sob a forma de calor e a restante é transmitida pela parede a outros locais. A transmissão sonora, por via área, entre dois recintos é um fenómeno complexo que pode envolver simultaneamente transmissões directas – quando as transmissões ocorrem através do elemento de separação comum aos dois recintos –, e transmissões indirectas ou marginais – quando as transmissões tomam lugar através dos elementos construtivos adjacentes.

Neste trabalho, como se pretende avaliar unicamente o comportamento acústico das soluções construtivas na zona corrente, serão ignoradas as transmissões indirectas. Mesmo considerando apenas a transmissão por via directa, o fenómeno de transmissão não é simples, pois envolve uma série de factores, entre os quais se destacam:

- Frequência do som incidente no elemento separador;
- Massa do elemento;
- Ângulo de incidência das ondas sonoras;
- Porosidade do elemento;
- Rigidez do elemento.

Existem alguns métodos que permitem estimar numericamente o índice de isolamento sonoro a sons aéreos. Neste estudo recorreu-se ao **Modelo Misto** proposto por Meisser (Meisser, 1973) e cuja adequação às soluções construtivas portuguesas foi estudada por Diogo Mateus e António Tadeu (Mateus *et al*, 1999). A explicação do método ultrapassa os objectivos deste documento, pelo que se aconselha ao leitor interessado e menos familiarizado com esta matéria, a leitura das obras anteriormente referenciadas. No entanto, serão seguidamente apresentados alguns dados e equações que justificam as curvas de isolamento sonoro a sons aéreos apresentados nos Anexos I e II.

1.1) Aplicação da lei da massa

O índice de redução sonora de um elemento de construção é tanto maior quanto maior for a sua massa. Esta relação é conhecida pela **Lei da Massa**. Num hipotético elemento, onde se despreza a rigidez e o amortecimento, é possível estabelecer, através de um modelo inercial, uma lei da massa teórica que se traduz num acréscimo de isolamento sonoro do elemento de separação de 6 dB por cada duplicação da massa ou duplicação da frequência do som, no caso de elementos de construção simples. Para os elementos duplos e triplos, segundo Meisser (Meisser, 1973), é possível considerar-se uma lei teórica da massa com inclinação média de 8 dB.

Este autor considera ainda, na previsão do índice de isolamento acústico, uma lei experimental da massa, traduzida nos elementos simples, duplos e triplos, por um acréscimo de 4 dB, 6 dB e 10 dB, respectivamente, por cada duplicação da massa ou duplicação da frequência.

Neste modelo de estimação, para o traçado da curva de isolamento é considerada a lei experimental da massa, mas com um posterior ajustamento ao modelo analítico, considerando a lei teórica da massa e as quebras de isolamento nas frequências próprias de vibração transversal por flexão e por efeito de coincidência.

A partir da análise experimental, verificou-se que o índice de isolamento acústico, na frequência de 500 Hz e para uma massa de 100 kg/m^2 era de 40 dB. Assim, a lei experimental da massa, para um som de 500 Hz (m em kg/m^2), pode ser expressa através da seguinte equação:

$$R_{500Hz} = 13{,}3 Log(m) + 13{,}4\ dB \qquad [7.2.1]$$

Em elementos de separação pesados, cuja massa é igual ou superior a 200 kg/m^2, da análise experimental verifica-se que é possível considerar para a lei da massa uma maior inclinação, pelo que este comportamento se aproxima à seguinte equação:

$$R_{500Hz} = 14{,}3 Log(m) + 11{,}1\ dB \qquad [7.2.2]$$

No caso de elementos duplos, o índice de isolamento acústico para os 500 Hz é obtido através da lei experimental da massa, resultante das equação 7.2.1 ou 7.2.2, acrescentando-lhe a diferença de isolamento entre elementos simples e duplos com a mesma massa superficial total (Dif.), como se pode observar na equação 7.2.3. Nas soluções correntes com caixas-de-ar com largura na gama dos 2 a 4 cm, esta diferença é, para a frequência dos 500 Hz, próxima dos 4 dB. Quando as caixas-de-ar apresentam largura superior a 4 cm a diferença é muito maior, podendo atingir os 9 dB no caso de soluções com painéis cujas massas não são muito diferentes.

$$R_{500Hz} = 14{,}3 Log(m) + 11{,}1\ dB + Dif. \qquad [7.2.3]$$

1.2) Frequência de ressonância do conjunto das massas e caixa-de-ar

A frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos através da equação 7.2.4.

$$fr = 84\sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m1} + \frac{1}{m2}\right)} \qquad [7.2.4]$$

em que:

d – largura da caixa-de-ar (m);

m_i – massa do pano i (kg/m^2).

Quando o valor da frequência de ressonância se situa fora da zona audível, isto é, geralmente abaixo dos 100 Hz, é desprezada a perturbação que ocorre na curva de isolamento sonoro na

frequência de ressonância do conjunto. Quando a frequência de ressonância é superior a 100 Hz deve-se corrigir o elemento construtivo, aumentando a largura da caixa-de-ar e/ou a massa de cada um dos panos.

1.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

As reflexões múltiplas das ondas sonoras que se verificam no interior da caixa-de-ar são responsáveis por quebras na curva de isolamento sonoro.

A frequência de ressonância da caixa-de-ar pode ser desprezada sempre que se utilize um material absorvente na caixa-de-ar. É importante ter em conta este fenómeno no caso de elementos duplos cuja caixa-de-ar não apresente um material absorvente como, por exemplo, nos vidros duplos.

1.4) Frequência crítica

As quebras de isolamento acústico a considerar na zona da frequência crítica dependem do amortecimento interno do material que constitui o elemento de separação. A quebra por efeito de coincidência correspondente a cada material com espessura unitária, assim como a frequência em que ocorre essa quebra – frequência crítica – estão apresentadas no quadro 7.7.

Quadro 7.7 – Frequências críticas e quebras associadas, para diferentes materiais (fontes: Mateus *et al*, 1999 e outras)

Material/produto	Frequência crítica para 1 cm de espessura (Hz)	Quebra por efeito de coincidência (dB)
Borracha	85 000	4
Cortiça	18 000	4
Poliestireno expandido	14 000	5
Madeira	6 000 a 18 000	6
Chumbo	8 000	5
Gesso	4 000	7
Betão celular autoclavado	3200	9
Tijolo maciço	2 500 a 5 000	9
Tijolo furado	2 000	9
Betão	1 800	8
Alumínio	1 300	10
Vidro	1 200	10
Aço	1 000	10

O valor da frequência crítica é calculado através da equação seguinte:

$$fc = \frac{fc_{1cm}}{esp.} \quad [7.2.5]$$

em que:

fc_{1cm} – frequência crítica do elemento de construção para 1cm de espessura (Hz);

esp. – espessura do elemento (cm).

1.5) Determinação do valor de $D_{n,w}$

Na determinação do índice de isolamento sonoro, $D_{n,w}$, recorreu-se à comparação do traçado do índice de redução sonora com um traçado convencional de referência, de acordo com a metodologia referida na Norma Portuguesa NP-2073.

Após o ajustamento das duas curvas, o valor do índice de isolamento, $D_{n,w}$, corresponde ao valor que a curva de referência ajustada assume para a frequência de 500 Hz.

2) Índice de isolamento a sons de percussão ($L'_{n,w}$)

Os ruídos resultantes da percussão em pavimentos são considerados como os mais incomodativos, na medida em que afectam a maior parte das pessoas. Os sons de percussão são originários de fontes que produzem vibrações em estruturas sólidas e propagam-se por toda a estrutura quase sem amortecimento. Estes sons são normalmente produzidos a partir de passos sobre pavimentos, queda de objectos, batimentos de portas, actos de martelar, arrastamento de móveis, funcionamento de máquinas, vibração de canalizações, entre outros.

Os ruídos de percussão nas habitações são mais relevantes nas zonas em que se utilizam revestimentos mais rígidos, como por exemplo, cozinhas e casas de banho.

Parte da quantidade de energia produzida por um impacto é dissipada pelo elemento construtivo – no momento e na zona de aplicação do impacto e ao longo do material –, sendo a restante transmitida pelo material. A energia dissipada no momento e na zona de aplicação do impacto depende do tipo de revestimento aplicado no elemento construtivo: quanto mais flexível for o revestimento maior será a quantidade de energia dissipada. A quantidade de energia transmitida pelo material depende, em grande parte, da rigidez desse material: quanto maior a rigidez do material maior será a quantidade de energia transmitida.

O valor do índice de isolamento a sons de percussão foi estimado através do **método do invariante $D_{n,w}$ + $L'_{n,w}$**. Este método encontra-se devidamente documentado numa das publicações do LNEC (Patrício, 1999).

Neste método, o índice de isolamento a sons de percussão ($L'_{n,w}$), conferido pelos elementos de compartimentação horizontais – pavimentos –, estima-se a partir do conhecimento prévio do valor do índice de isolamento sonoro a sons aéreos ($D_{n,w}$). A determinação do índice de

isolamento sonoro ($L'_{n,w}$) é baseada no quadro 7.8 , que apresenta, para cada tipo de pavimento, um valor constante do invariante $D_{n,w} + L'_{n,w}$.

Quadro 7.8 – Tipificações de lajes de edifícios – método do invariante $D_{n,w} + L'_{n,w}$ (fonte: Patrício, 1999)

Tipo de Pavimento	Dn,w+L'n,w (Dn,w, dB) (L'n,w, dB/oit.)
Laje de betão não revestida (espessuras correntes)	130 a 135
Laje de betão revestida com tacos de madeira	120
Laje de betão com lajeta flutuante revestida com tacos de madeira	115
Pavimento de vigotas pré-esforçadas com blocos de cofragem e betão complementar	125 a 130
Laje de betão com piso flutuante de madeira	117

O isolamento sonoro a sons de percussão, para além de poder ser melhorado através da aplicação de um revestimento flexível, pode ainda ser corrigido através da aplicação de materiais isolantes intermédios – entre a laje de piso e a lajeta flutuante. O quadro 7.9 apresenta os valores de $\Delta L'_{n,w}$ obtidos experimentalmente no caso de pavimentos com lajeta flutuante. O parâmetro $\Delta L'_{n,w}$ apresenta a diferença entre o índice $\Delta L'_{n,w}$, em dB, antes e depois da execução da solução construtiva.

Quadro 7.9 – Reduções globais na transmissão de ruídos de percussão com laje flutuante (fonte: Mateus *et al*, 1999)

Natureza do revestimento de piso				$\Delta L'_{n,w}$ (dB/oit.)
Designação	Características do elemento resiliente			
	Material	Massa volúmica (kg/m^3)	Espessura (mm)	
Lajeta flutuante de 40mm de espessura com a face aparente revestida a tacos de pinho.	Aglomerado negro de cortiça	95	10	19
		100	20	20
		100	10	18
		102	6	17
		112	10	18
		120	40	20
		140	12	18
		194	5	15
	Feltro betuminoso com granulado de cortiça	Massa volúmica do granulado (kg/m^3)		
		52		19
		66		20
		114		21
		146		20

7.2.2.2. Isolamento térmico

O isolamento térmico das soluções construtivas é caracterizado através do coeficiente global de transmissão térmica (U). Este coeficiente, num elemento de construção de faces planas e paralelas, representa a quantidade de calor que o atravessa perpendicularmente, por unidade de tempo e superfície, quando sujeito a um gradiente unitário entre os ambientes que separa.

O valor máximo permitido para os coeficientes de transmissão térmica dos elementos de construção das envolventes dos edifícios encontra-se definido no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (R.C.C.T.E. – DL 40/90 de 6 de Fevereiro) (Quadro 9.1). Este parâmetro é obtido através da equação 7.2.6, que se aplica em casos em que o elemento é constituído por um ou vários materiais, em camadas de espessura constante.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{hi} + \sum_j R_j + R_{ar} + \frac{1}{he}} \qquad [7.2.6]$$

em que:

$1/h_i$ – resistência térmica superficial interior (m^2.ºC/W);

$R_j = e_j/?_j$ – resistência térmica da camada j (m^2.ºC/W);

e_j – espessura da camada j (m);

$?_j$ – condutibilidade térmica da camada j (W/m.ºC);

R_{ar} – resistência térmica dos espaços de ar não ventilados (m^2 ºC/W);

$1/h_e$ – resistência térmica superficial exterior (m^2. ºC/W).

A resistência térmica superficial ($1/h_e$, $1/h_i$) traduz o efeito da convecção e radiação, e o seu valor varia em função de diversos factores, tais como a rugosidade da superfície, posição da superfície, entre outros. Contudo, na prática são utilizados valores médios. Os valores das resistências térmicas superficiais encontram-se apresentados no quadro 7.10 em função da posição do elemento construtivo e do sentido do fluxo de calor.

No quadro 7.6, apresentado anteriormente, encontram-se tabeladas as condutibilidades térmicas (?) dos materiais de construção que compõem as soluções construtivas analisadas.

A resistência térmica dos espaços de ar não ventilados (R_{ar}) depende da sua espessura e encontra-se definida no quadro 7.11, em função da posição do elemento construtivo, espessura do espaço de ar e do sentido do fluxo de calor.

Quadro 7.10 – Resistências térmicas superficiais (fonte: Santos *et al*, 1990)

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial ($m^2.^oC/W$)	
	Exterior ($1/h_e$)	Interior ($1/h_i$)
Horizontal (*)	0,04	0,12
Vertical (**)		
Ascendente	0,04	0,10
Descendente	0,04	0,17

(*) – Paredes
(**) – Coberturas e pavimentos

Quadro 7.11 – Resistência térmica dos espaços de ar não ventilados

Sentido do fluxo de calor	Espessura do espaço de ar (mm)	Resistência térmica (R_{ar}) ($m^2.^oC/W$)
Horizontal (*)	10	0.14
	20	0.16
	50 a 100	0.17
Vertical (**)	10	0.13
Ascendente	20	0.14
	50 a 100	0.14
Vertical (**)	10	0.15
Descendente	20	0.18
	50 a 100	0.21

(*) – Paredes
(**) – Coberturas e pavimentos

Nos elementos horizontais – pavimentos –, o isolamento térmico vai ser caracterizado através do coeficiente global médio de transmissão térmica (U_{med}), que resulta da média da soma do coeficiente global de transmissão térmica ascendente com o coeficiente de transmissão térmica descendente.

Quanto menor o valor do coeficiente global de transmissão térmica (U), menores serão as trocas de calor entre as duas faces de um elemento construtivo, o que contribui para a diminuição do consumo de energia convencional nas operações relacionadas com a manutenção das condições de conforto térmico dos espaços habitados.

7.2.3. Parâmetros económicos

Tal como se referiu no capítulo 3.2.2.6 o custo de construção/aquisição é, na maior parte das vezes e erradamente, o aspecto que mais influencia a opção por uma determinada solução construtiva. A análise económica de uma solução construtiva não deve abordar apenas o custo de construção mas todos os custos relacionados com o seu ciclo de vida, pois pequenos acréscimos no investimento inicial podem resultar em poupanças significativas ao nível dos custos de operação e manutenção.

O custo de construção não deve por si só influenciar a decisão, mas em conjunto com a análise de outros parâmetros, nomeadamente ambientais e funcionais, pode constituir um critério de desempate. Também é preciso não esquecer que existem no mercado certas tecnologias construtivas que, apesar de estarem associadas a um investimento inicial superior ao das tecnologias utilizadas correntemente, não apresentam quaisquer vantagens funcionais ou económicas – nas restantes fases do ciclo de vida.

De modo a relacionar o desempenho ambiental e as características funcionais com o custo de construção e a comparar as diversas soluções construtivas a este nível, decidiu-se estimar, para cada solução construtiva, o custo de construção associado, pelo que este será o único parâmetro económico avaliado neste estudo.

Os custos de construção apresentam-se neste trabalho por unidade de superfície de solução construtiva. O custo de cada solução foi estimado através da média de valores obtidos para o preço unitário de cada artigo de construção, numa sondagem realizada a algumas empresas de construção com sede no distrito de Braga. Os custos apresentados espelham a realidade do mercado da construção nessa zona do país durante o ano de 2003.

CAPÍTULO 8

ANALISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS

8.1. Critérios adoptados na definição das soluções construtivas

Depois de se analisarem as soluções construtivas dos pavimentos de alguns edifícios construídos no Norte do país, nomeadamente nos distritos do Porto e de Braga, verificou-se a preponderância da solução construtiva composta por vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem. Assim, no presente estudo, esta solução construtiva foi considerada a solução de referência para os pavimentos.

Os pavimentos apresentam uma importante função estrutural, pois são responsáveis pela distribuição das acções a que estão sujeitos pelas vigas ou directamente pelos elementos estruturais verticais. Tendo em conta a sua importante função estrutural, o comportamento mecânico foi o critério adoptado para a definição das soluções construtivas estudadas: todas as soluções construtivas de pavimentos foram definidas de modo a que fossem compatíveis com os esforços que se desenvolvem num vão de 6m devido às acções correntes nos pavimentos de um edifício de habitação (quadro 8.1).

Quadro 8.1 – Acções consideradas no dimensionamento das soluções construtivas para pavimentos

Acção	Valor (kN/m^2)
Peso próprio	Depende da solução
Peso dos revestimentos	1,00
Paredes divisórias	1,50
Sobrecarga	2,00

8.2. Tecnologias construtivas analisadas

Os pavimentos representam o elemento estrutural que suporta todos os esforços que são aplicados num piso, e constituem o elemento de separação horizontal entre dois andares. Este elemento construtivo pode assumir duas funções distintas: para os locais que se encontram por baixo, assume a função de tecto, e para os locais por cima, serve de piso de suporte.

Neste elemento construtivo é possível identificar três diferentes partes constituintes:

(i) **Elementos de suporte:** vigotas prefabricadas de betão pré-esforçado, painéis alveolares de betão pré-esforçado, vigas metálicas, vigas de madeira, vigas prefabricadas de betão armado ou pré-esforçado, assim como as lajes maciças ou nervuradas de betão armado, entre outros;

(ii) **Revestimento superior:** que constitui o acabamento do pavimento e que descansa sobre a armação ou estrutura de suporte: lajeado, soalho de madeira, revestimentos sintéticos, entre outros;

(iii) **Revestimento inferior:** executado por baixo dos elementos de suporte e que pode ser rebocado, estucado com gesso ou revestido com placas prefabricadas de materiais de todos os tipos.

Neste trabalho foram estudados cinco tipos distintos de tecnologias construtivas para pavimentos, cujas diferenças residem fundamentalmente ao nível da parte encarregada pelo suporte:

(i) **Pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem**;

(ii) **Pavimentos em laje maciça de betão armado**;

(iii) **Pavimentos em painéis alveolares prefabricados de betão pré-esforçado**;

(iv) **Pavimentos mistos com cofragem metálica colaborante**;

(v) **Pavimentos em madeira**.

Dentro de cada tipo de tecnologia construtiva, à excepção dos pavimentos de madeira, a metodologia MARS-SC foi aplicada a três soluções possíveis: na primeira só foi considerada a parte encarregada pelo suporte do pavimento, sem qualquer tipo de isolante; na segunda, numa tentativa de melhorar o isolamento térmico e o comportamento sonoro do pavimento a sons de condução aérea, considera-se a existência de um tecto falso com isolante no tardoz; por último, de modo a melhorar o comportamento sonoro aos sons de percussão, introduziu-se na solução anterior uma lajeta flutuante.

O **tecto falso**, integrado em cada tecnologia construtiva, encontra-se desligado rigidamente da laje e separado desta por uma caixa-de-ar com 15 cm de espessura. O tecto falso é composto pelas seguintes camadas:

(i) Revestimento em placas de gesso cartonado com 1,25 cm de espessura;

(ii) Manta de lã de rocha, com densidade de 40 kg/m^3 e espessura de 2,5 cm, assente no tardoz das placas de gesso cartonado.

A **lajeta flutuante** é materializada, pelas seguintes camadas:

(i) Espuma de polietileno em folha com densidade de 32 kg/m^3 e 0,3 cm de espessura;

(ii) Aglomerado negro de cortiça com densidade de 140 kg/m^3 e 4 cm de espessura;

(iii) Lajeta de betão de argila expandida com densidade de 750 kg/m^3 e 4 cm de espessura.

Nos pavimentos de madeira, aplicou-se a metodologia MARS-SC a quatro soluções construtivas em que o comportamento acústico, a sons de condução aérea e de percussão, já tinha sido avaliado experimentalmente. Os resultados dessa avaliação experimental foram publicados por Martin (1995). A informação obtida experimentalmente é complementada com os parâmetros quantificados numericamente no presente trabalho.

De seguida, realiza-se uma breve apresentação de cada tecnologia construtiva, acompanhada pela representação gráfica de cada solução estudada. A marcha de cálculo encontra-se descrita no Anexo I e os resultados obtidos apresentam-se no quadro 8.3.

8.2.1. Pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem

8.2.1.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Este tipo de pavimento é aquele que assume, devido à sua utilização intensiva, maior relevância no contexto da construção portuguesa. Esta tecnologia é essencialmente constituída por vigotas de betão pré-esforçado e blocos de cofragem apoiados lateralmente sobre estas, formando um conjunto que é solidarizado por uma camada contínua de betão complementar executada “in situ” com função resistente.

Pela sua constituição e garantia de ligação eficiente das vigotas ao betão complementar, esta tecnologia de pavimentos pode considerar-se comparável, sob o ponto de vista de funcionamento estrutural, a uma laje com armadura resistente numa só direcção.

Existem vários tipos de blocos de cofragem, variando nas dimensões e no tipo de material (tijolo vazado, poliestireno expandido - EPS, cortiça, betão de argila expandida, etc). A integração de elementos vazados na sua constituição traduz-se, em relação a uma laje maciça com a mesma massa, num melhor comportamento térmico e acústico. A utilização de blocos de cofragem de materiais isolantes – como o EPS ou a cortiça – permite melhorar o comportamento térmico das soluções, piorando, no entanto, a inércia térmica e a estabilidade ao fogo.

Este tipo de tecnologia apresenta tradicionalmente elevada massa por unidade de superfície, ainda que, para um vão com as mesmas dimensões e acções, seja menor do que as lajes de betão armado; e elevada PEC. Apresenta também uma levada contribuição para a inércia térmica dos edifícios.

A durabilidade é bastante elevada mas o potencial de reutilização é nulo. A reciclagem é possível. No entanto, a sua constituição heterogénea torna este processo complexo.

Na figura 8.1, apresenta-se o aspecto de um pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, antes da colocação do betão complementar.

Figura 8.1 – Aspecto de um pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, antes da colocação do betão complementar

8.2.1.2. Descrição das soluções construtivas

O pavimento foi dimensionado através do programa de cálculo de um fabricante, de modo a que se verificasse a segurança aos estados limites últimos e de utilização. Deste modo, é necessário um pavimento do tipo 2V5 – C40x21-25, isto é, um pavimento de dupla vigota, com altura total de 25 cm e camada de betão complementar – com 4 cm de espessura – armada com armadura de distribuição em rede electrossoldada A50. Os blocos de cofragem são cerâmicos e apresentam três fiadas de furos.

Nas figuras 8.2 a 8.4, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante – solução construtiva de referência (Pav1)

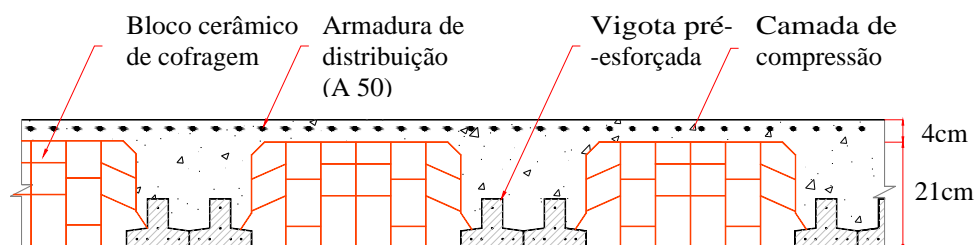



Figura 8.2 – Pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, sem isolante (Pav1 - solução de referência)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav2)

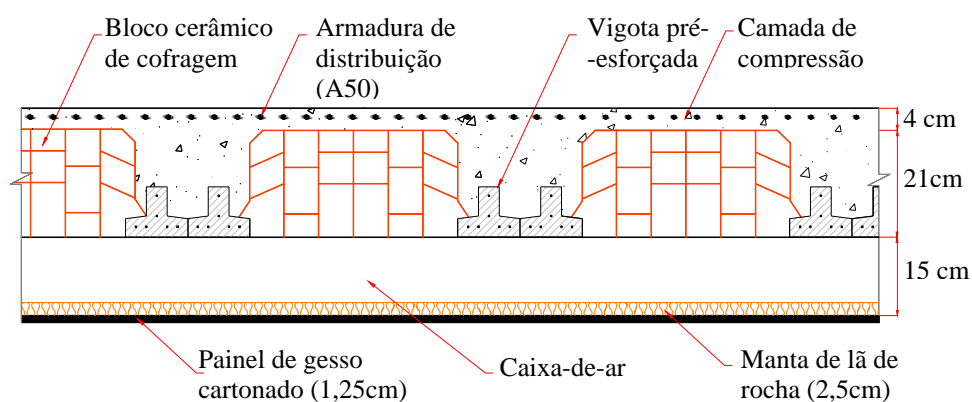



Figura 8.3 – Pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, com tecto falso e isolante no tardoz (Pav2)

3) Pavimento com isolante térmico, tecto falso e lajeta flutuante (Pav3)

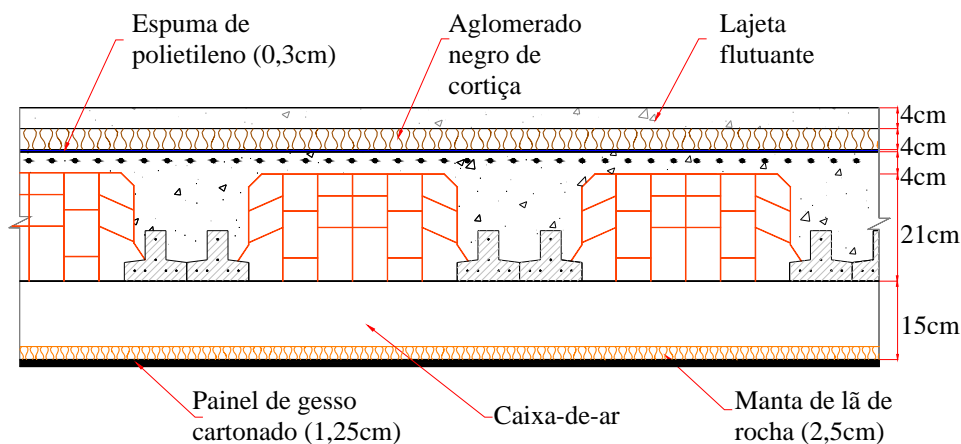



Figura 8.4 – Pavimento aligeirado de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav3)

8.2.2. Pavimentos de estrutura contínua em laje maciça de betão armado

8.2.2.1. Apresentação da tecnologia construtiva

As lajes maciças são fabricadas inteiramente em obra, requerendo uma grande quantidade de trabalho de cofragem e, por conseguinte, grande carga de mão-de-obra. Este tipo de laje apresenta espessura constante e pode ser armado numa só direcção ou em duas direcções ortogonais.

Esta tecnologia construtiva apresenta as vantagens de ser um dos sistemas mais económicos no caso de vãos de pequena dimensão e de não requerer mão-de-obra com elevado grau de qualificação. Em contrapartida, apresenta como principais desvantagens a sua elevada massa e a dificuldade em permitir a passagem de instalações.

A considerável massa do betão oferece uma boa inércia térmica e elevado isolamento a ruídos de condução aérea, prejudicando, no entanto, o seu comportamento térmico, por condução. Assim, quando este tipo de pavimento se encontra numa das envolventes de um edifício é necessário introduzirem-se revestimentos isolantes de maior espessura do que nas lajes aligeiradas.

A nível ambiental o seu desempenho é prejudicado fundamentalmente pela sua elevada massa. O betão armado apresenta tradicionalmente grande quantidade de energia primária. Esta energia pode, no entanto, ser reduzida se se utilizarem armaduras e/ou agregados reciclados. A grande quantidade de trabalho de cofragens e a necessidade de se utilizar grande quantidade de óleos descofrantes, potenciam os impactes ambientais durante a fase de construção. Apesar do seu ciclo de vida ser dilatado – quando não exposta aos agentes atmosféricos –, no final, o processo

de desmantelamento/demolição é complexo e o potencial de reutilização é nulo. A reciclagem é possível, embora o processo envolva grande consumo energético.

Apesar das reservas enunciadas, a elevada inércia térmica torna esta tecnologia adequada a sistemas de construção que recorram a soluções construtivas de baixa massa para as paredes. Nesse caso, os pavimentos asseguram a massa necessária à acumulação de calor, evitando grandes flutuações na temperatura nos espaços habitados, reduzindo o consumo energético convencional nas operações de aquecimento e arrefecimento, e aumentando o conforto.

Na figura 8.5, apresenta-se o aspecto de uma laje maciça numa das etapas da fase de construção.

Figura 8.5 – Aspecto de uma laje maciça durante a fase de construção (antes da betonagem)

8.2.2.2. Descrição das soluções construtivas

A laje foi dimensionada de acordo com a metodologia preconizada pelo Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado, apresentando uma altura total de 20 cm.

Nas figuras 8.6 a 8.8, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante (Pav4)

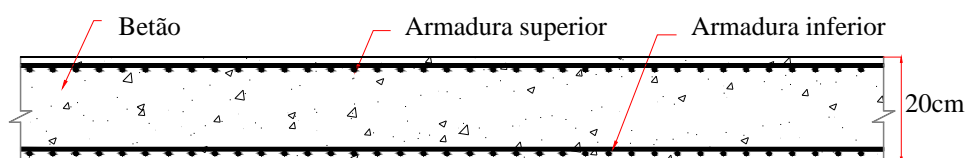



Figura 8.6 – Pavimento de estrutura contínua em laje maciça de betão armado sem isolante (Pav4)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav5)

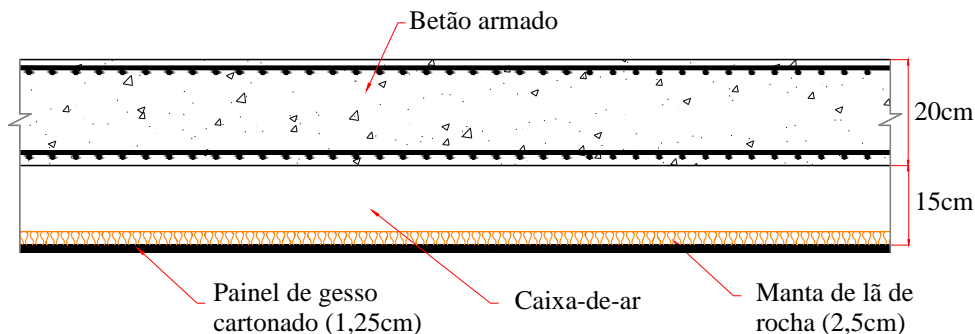



Figura 8.7 – Pavimento de estrutura contínua em laje maciça de betão armado com tecto falso e isolante no tardoz (Pav5)

3) Pavimento com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav6)

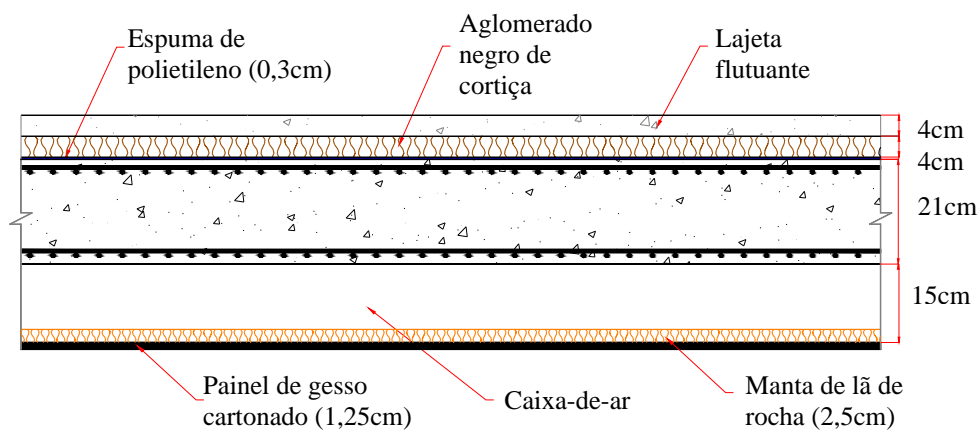



Figura 8.8 – Pavimento de estrutura contínua em laje maciça de betão armado com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav6)

8.2.3. Pavimentos de painéis alveolares prefabricados de betão pré-esforçado

8.2.3.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Neste tipo de tecnologia, os pavimentos são compostos por painéis alveolares prefabricados de betão pré-esforçado, dispostos lado a lado, deixando entre si espaços livres – juntas – cujo preenchimento é realizado em obra, com betão de solidarização. Quando se pretende maior resistência é possível a realização de uma camada contínua de betão armado – betão complementar – sobre a superfície do pavimento. O seu comportamento estrutural é semelhante ao de uma laje com armadura resistente unidireccional. Esta tecnologia surgiu na procura de soluções com maior grau de industrialização, que permitissem a diminuição dos prazos de construção e a utilização de menores quantidades de mão-de-obra na fase de construção

Relativamente às vantagens desta tecnologia é de salientar que, relativamente aos pavimentos de lajes maciças de betão armado, em igualdade de vãos e de sobrecargas, possuem menor peso próprio, o que permite o aligeiramento das estruturas de suporte de cargas verticais dos edifícios. Outra vantagem é que dispensa o uso de cofragens e de escoramentos intermédios. Por ser constituída por elementos vazados, confere melhor isolamento térmico entre andares do que as lajes maciças.

Como reservas, é de salientar o mau comportamento ao fogo e a dificuldade que existe na implantação e cruzamento de instalações

A nível ambiental, o seu desempenho é melhor do que o das lajes maciças, pois apresenta menor massa e, por conseguinte, menor quantidade de energia incorporada. A utilização de menor quantidade de aço também contribui para este aspecto. O seu desmantelamento é mais simples do que nas tecnologias referidas anteriormente, e a reutilização dos painéis é possível, principalmente quando não existe camada de betão complementar.

Nas figuras 8.9 e 8.10 apresentam-se duas fases do processo construtivo.

Figura 8.9 – Transporte de lajes alveolares

Figura 8.10 – Aplicação de lajes alveolares

8.2.3.2. Descrição das soluções construtivas

Para o seu dimensionamento estrutural, recorreu-se a um ábaco apresentado nas especificações técnicas de um fabricante. Em função do vão e das acções será necessário um pavimento com 20 cm de altura total, composto por painéis alveolares com 16 cm de altura e camada de betão complementar de 4 cm.

Nas figuras 8.11 a 8.13, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante (Pav7)

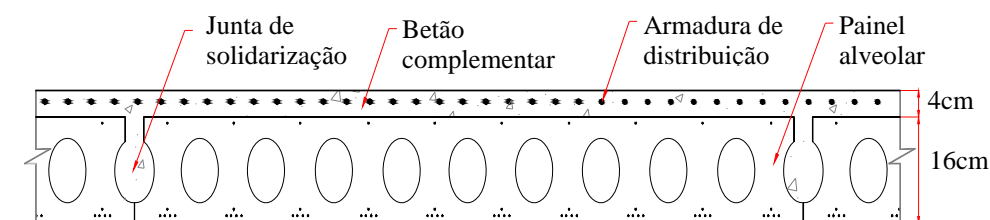



Figura 8.11 – Pavimento de painéis alveolares sem isolante térmico (Pav7)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav8)

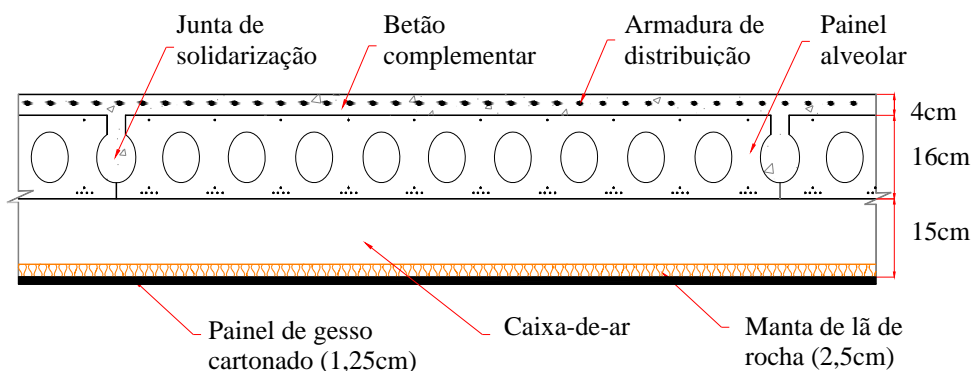



Figura 8.12 – Pavimento em painéis alveolares com tecto falso e isolante térmico no tardoz (Pav8)

3) Pavimento com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav9)

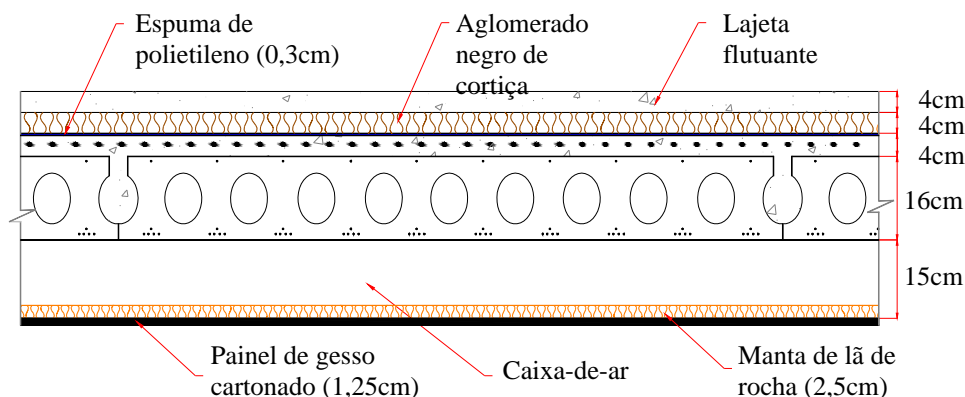



Figura 8.13 – Pavimento em painéis alveolares com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante (Pav9)

8.2.4. Pavimentos mistos com cofragem metálica colaborante

8.2.4.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Este tipo de pavimento, tal como no anterior, teve origem na procura de soluções construtivas com maior grau de industrialização. Esta tecnologia é composta por chapas metálicas onduladas – assentes geralmente em vigas de aço laminado –, sobre as quais se realiza uma camada de betão armado – camada complementar (fig. 8.14 e 8.15).

As chapas metálicas actuam como cofragem perdida e como armadura de momentos positivos. Evitam-se assim, os morosos processos de desmontagem e manutenção das cofragens, muito característico no caso das lajes maciças.

Com esta tecnologia é possível, em igualdade de vãos e de sobrecargas, realizarem-se pavimentos com menor espessura do que a dos pavimentos com laje contínua de betão armado ou de vigotas pré-esforçadas e blocos de cofragem. A sua massa é assim menor do que a dos pavimentos convencionais, o que torna esta tecnologia adequada a locais onde a distância de transporte dos materiais/produtos é significativa. O tempo necessário à sua construção e a quantidade de mão-de-obra necessária são também menores do que nos pavimentos convencionais.

O potencial de reutilização é praticamente nulo, pois só se conseguem reaproveitar as vigas metálicas que suportam o pavimento. O elevado grau de ligação entre as chapas metálicas e a camada de betão tornam os processos de reciclagem complexos e dispendiosos.

Para mais informações acerca tecnologia construtiva, bem como do sistema construtivo a que está correntemente associada, consultar o capítulo 5.2.

Figura 8.14 – Aspecto da face inferior – tecto – de um pavimento misto de cofragem metálica colaborante

Figura 8.15 – Aspecto da face superior de um pavimento de cofragem metálica colaborante durante a fase de construção – antes da betonagem

8.2.4.2. Descrição das soluções construtivas

De acordo com o vão, sobrecargas em causa e com as características técnicas apresentadas por um fabricante de componentes para este tipo de tecnologia, será necessário que o pavimento seja constituído por chapa colaborante com 0,75 mm de espessura e peso próprio de 8,51 kg/m^2, sobre a qual assentará uma camada de betão armado – betão complementar – com 10 cm de espessura máxima. Atendendo às características mecânicas da chapa e às acções actuantes, será necessário que estrutura principal das soluções construtivas seja constituída por perfis de aço laminado INP 160, espaçados, no máximo, de 1 m.

Nas figuras 8.16 a 8.18, representam-se graficamente as três soluções construtivas analisadas. As características do tecto falso e da lajeta flutuante encontram-se descritas em 8.2.

1) Pavimento sem isolante (Pav10)

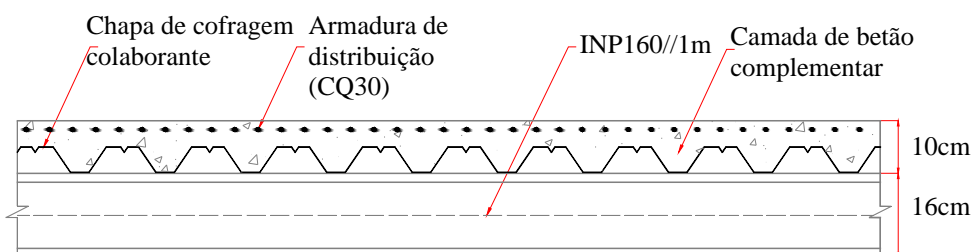



Figura 8.16 – Pavimento misto de cofragem metálica colaborante sem isolante térmico (Pav10)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav11)

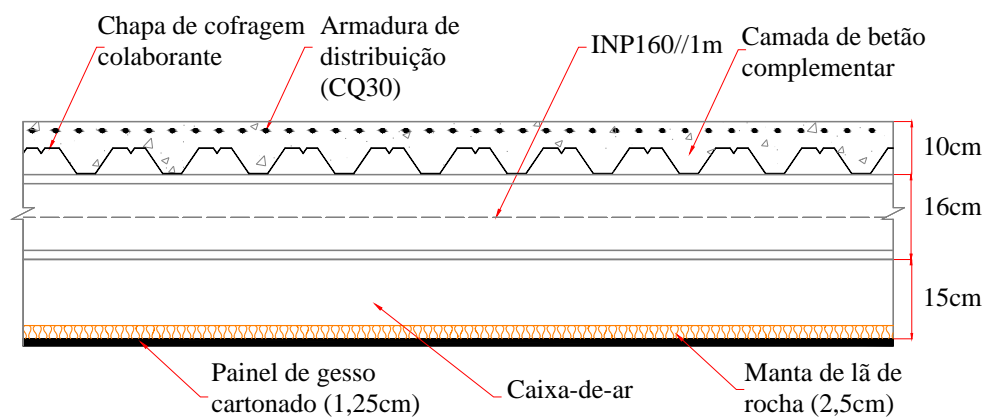



Figura 8.17 – Pavimento misto de cofragem metálica colaborante com tecto falso e isolante térmico (Pav11)

3) Pavimento com tecto falso, isolante e lajeta flutuante (Pav12)

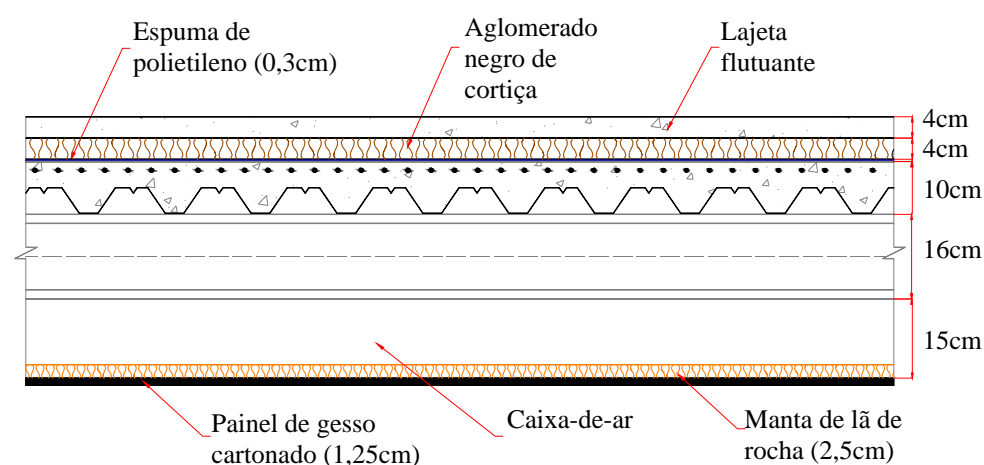



Figura 8.18 – Pavimento misto de cofragem metálica colaborante com tecto falso, isolante térmico e lajeta flutuante (Pav12)

8.2.5. Pavimentos de estrutura descontínua em madeira

8.2.5.1. Apresentação da tecnologia construtiva

Antes do aparecimento do betão armado, esta era praticamente a única tecnologia de pavimentos existente em Portugal. Actualmente, só muito raramente se recorre a este tipo de tecnologia, pois

as lajes de betão armado ou de elementos metálicos prestam-se melhor às exigências mecânicas pretendidas.

Este tipo de tecnologia possui a grande vantagem de ser bastante mais leve do que as restantes tecnologias construtivas. A baixa massa torna este tipo de pavimentos adequado a locais em que a distância de transporte dos materiais e componentes de construção é elevada.

Os pavimentos de madeira apresentam baixa energia primária incorporada e baixa inércia térmica. A sua baixa inércia térmica poderá, sempre que necessário, ser compensada pela sua utilização em conjunto com outras tecnologias construtivas mais pesadas.

A madeira, desde que tenha origem em plantações sustentáveis – doutra forma o impacte na biodiversidade será elevado –, é um dos materiais de construção com menor impacte ambiental. Também é preciso ter em atenção os compostos químicos utilizados para a sua preservação que, em alguns casos, podem comprometer a qualidade do ar interior (consultar o capítulo 3.2.2.5).

O revestimento deste tipo de pavimentos é geralmente descontínuo, podendo constituir uma fonte de infiltração de ar. Para que não se comprometa os seus comportamentos térmico e acústico deve-se assegurar um adequado encaixe entre os diversos componentes.

A sua durabilidade pode ser elevada, desde que devidamente protegida contra os microorganismos e da humidade. As ligações entre os diversos componentes são mecânicas, o que torna possível o processo de desconstrução e elevado o potencial de reutilização.

Na figura 8.19, apresenta-se o aspecto de um pavimento de estrutura descontínua em madeira.

Figura 8.19 – Aspecto inferior de um pavimento de estrutura descontínua em madeira

8.2.5.2. Descrição das soluções construtivas

Este tipo de pavimento foi dimensionado de acordo com a metodologia proposta pelo Eurocódigo 5, tendo-se admitido a utilização de peças de madeira da classe C24 ($f_{m,k}$[1] = 24 Mpa). O vigamento das soluções construtivas é composto por elementos em madeira de secção 0,25x0,30 m, afastados entre si de 0,65 m.

Tendo como base o estudo referido anteriormente, foram analisadas quatro soluções construtivas, cujas diferenças se verificam ao nível do revestimento de piso e do revestimento de tecto:

(i) Pavimento de estrutura descontínua em madeira sem isolante térmico, composto por piso em madeira (1,80 cm) e tecto revestido com painéis de gesso cartonado (1,25 cm) (fig. 8.20).

(ii) Pavimento de estrutura descontínua em madeira, com piso em madeira (1,80 cm), tecto falso composto por dois níveis de painéis de gesso cartonado (2x1,25 cm) e manta de lã de rocha (8 cm) aplicada no tardoz do tecto (fig. 8.21)

(iii) Pavimento de estrutura descontínua em madeira, com revestimento de piso flutuante sobre revestimento estrutural em madeira (1,80 cm), tecto revestido com painéis de gesso cartonado (1,25 cm) e manta de lã de rocha (8 cm) aplicada no tardoz do tecto (fig. 8.22).

(iv) Pavimento de estrutura descontínua em madeira, com piso flutuante em madeira (1,80 cm), tecto revestido com painéis de gesso cartonado (1,25 cm) e manta de lã de rocha (8 cm) aplicada no tardoz do tecto (fig. 8.23).

É de salientar que no estudo publicado por Martin (1995), o comportamento sonoro foi avaliado em pavimentos em que a altura das vigas era de 20 cm. Atendendo à maior altura das vigas – 30 cm – dos pavimentos estudados neste documento, é possível que estes apresentem na realidade melhor comportamento sonoro.

[1] Valor característico da resistência à flexão.

1) Pavimento sem isolante (Pav13)

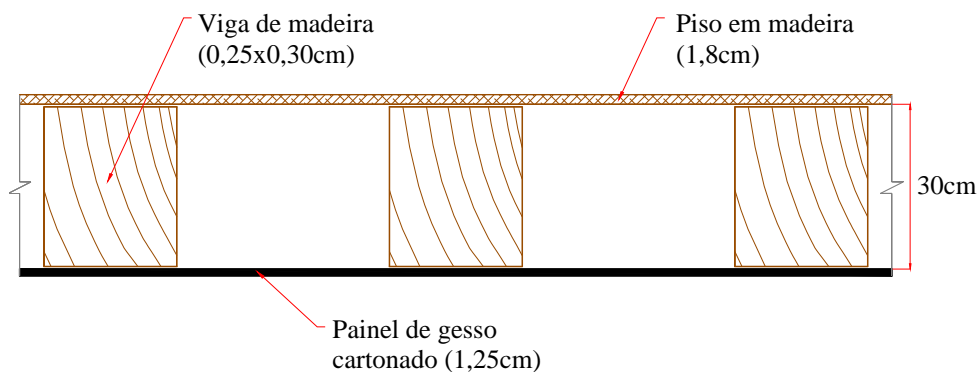



Figura 8.19 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira sem isolante (Pav13)

2) Pavimento com tecto falso e isolante (Pav14)

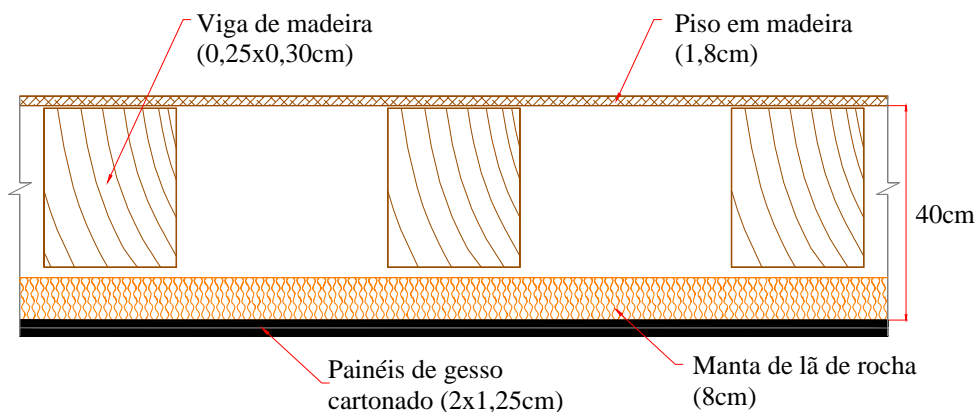



Figura 8.20 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira com tecto falso e isolante (Pav14)

3) Pavimento com isolante e piso flutuante sobre revestimento estrutural (Pav15)

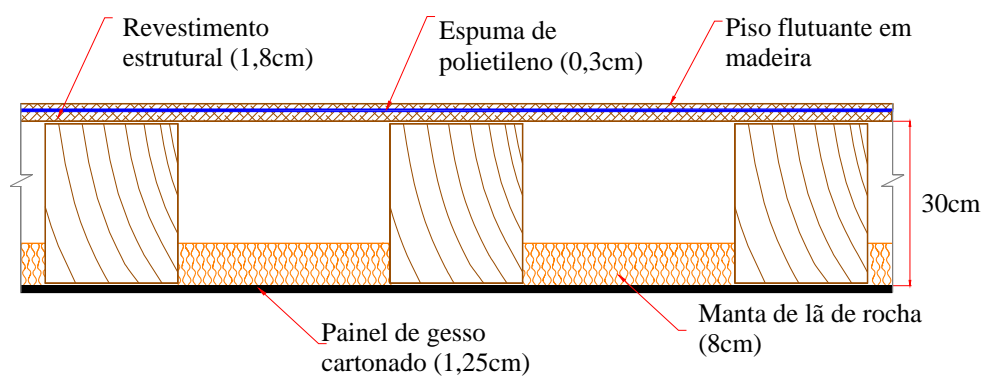



Figura 8.21 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira com isolante e piso flutuante sobre revestimento estrutural (Pav15)

4) Pavimento com isolante e piso flutuante (Pav16)

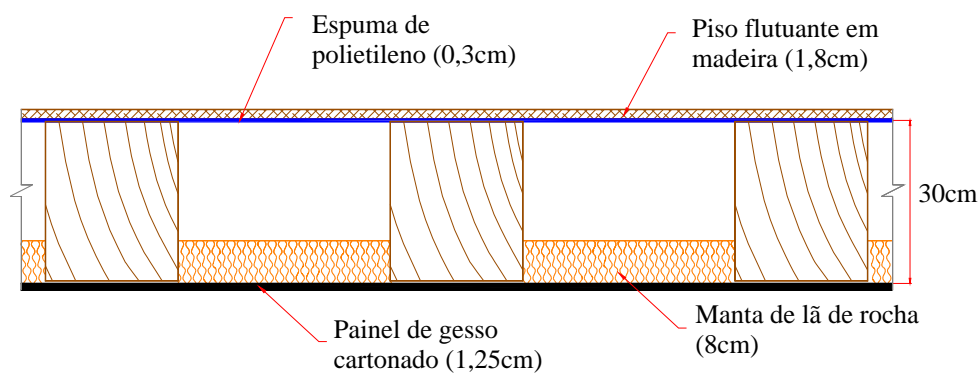
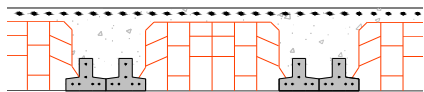
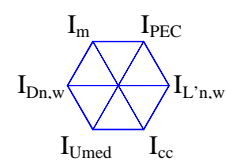
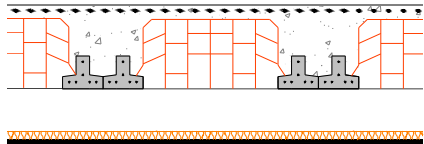
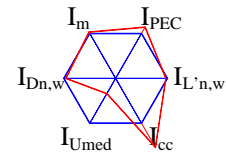
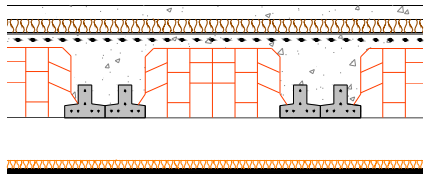
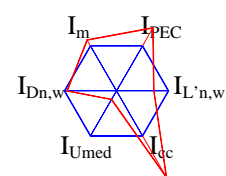
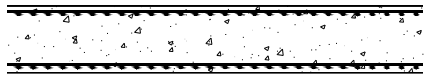
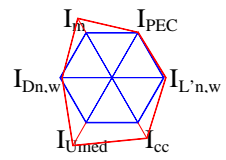
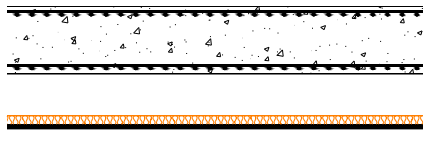
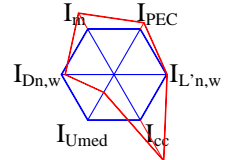
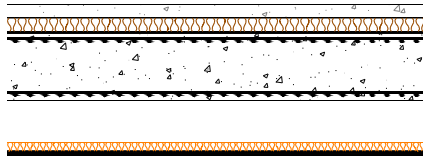
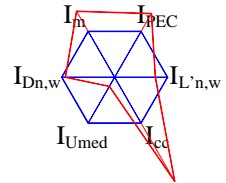
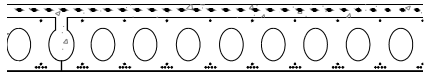
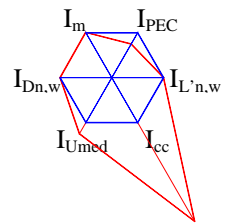
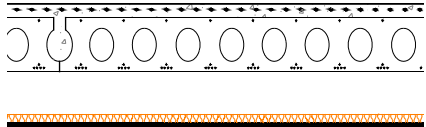
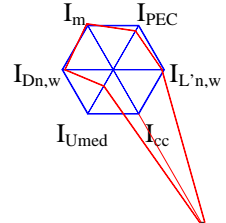
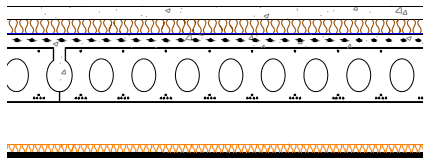
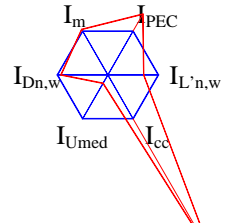
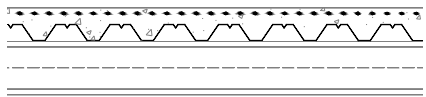
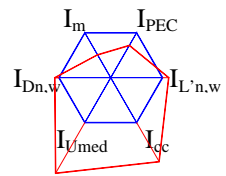
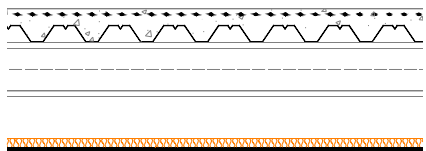
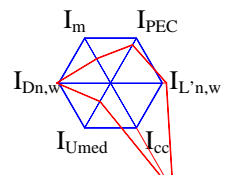
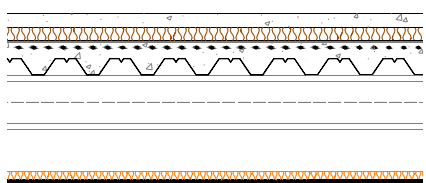
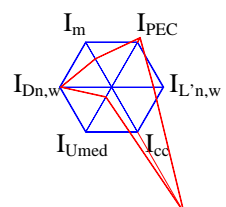
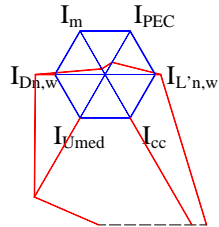
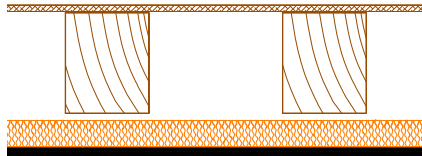
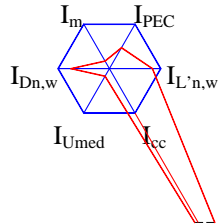
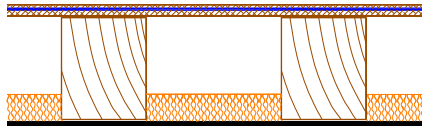
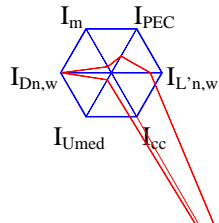
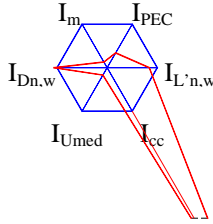



Figura 8.22 – Pavimento de estrutura descontínua em madeira com isolante e piso flutuante

8.3. Resultados obtidos

Os resultados obtidos encontram-se apresentados no quadro 8.2.

Quadro 8.2 – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav1 (referência) - descrição em 8.2.1	373	163	53	75	2,35	35,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav2 – descrição em 8.2.1	385	186	55	73	0,80	54,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav3 – descrição em 8.2.1	421	227	56	54	0,45	68,00	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav4 – descrição em 8.2.2	491	164	55	78	3,50	47,90	
Pav5 – descrição em 8.2.2	503	185	57	76	0,90	66,90	
Pav6 – descrição em 8.2.2	539	227	57	58	0,45	80,50	

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m²)	PEC (kW.h/m²)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m².ºC)	Custo (€/m²)	Perfil sustentável
Pav7 – descrição em 8.2.3	377	122	53	75	2,89	113,50	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav8 – descrição em 8.2.3	389	144	56	72	0,85	132,50	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav9 – descrição em 8.2.3	425	185	57	53	0,45	146,10	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m²)	PEC (kW.h/m²)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m².ºC)	Custo (€/m²)	Perfil sustentável
Pav10 – descrição em 8.2.4	188	117	49	84	4,95	66,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav11 – descrição em 8.2.4	200	138	52	81	0,95	85,45	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav12 – descrição em 8.2.4	236	180	54	61	0,50	99,05	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva Descrição	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav13 – descrição em 8.2.5	48	46	38	83	1,90	166,80	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav14 – descrição em 8.2.5	62	76	63	56	0,39	199,20	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}
Pav15 – descrição em 8.2.5	52	57	54	58	0,37	199,25	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

Quadro 8.2 (cont.) – Resumo das características técnico-funcionais mais importantes de algumas soluções construtivas para pavimentos

Solução construtiva	Massa (kg/m^2)	PEC (kW.h/m^2)	$D_{n,w}$ (dB)	$L'_{n,w}$ (dB)	U_{med} (W/m^2.ºC)	Custo (€/m^2)	Perfil sustentável
Pav16 – descrição em 8.2.5	50	56	50	63	0,40	181,75	I_m I_{PEC} $I_{Dn,w}$ $I_{L'n,w}$ I_{Umed} I_{cc}

8.4. Discussão dos resultados

Em primeiro lugar, é necessário salientar que a interpretação dos resultados obtidos não pode ser alienada do conjunto de exigências funcionais que se pretende para determinado pavimento. Por exemplo, num pavimento interior, que divida dois espaços aquecidos pertencentes a um mesmo fogo, não é exigido que este satisfaça qualquer requisito térmico, o que alteraria significativamente as conclusões descritas seguidamente. O mesmo poderia ocorrer ao nível das exigências para o isolamento sonoro. Assim, os resultados obtidos serão discutidos admitindo que se pretende que o pavimento a seleccionar apresente bom isolamento sonoro, bom isolamento térmico, bom desempenho ambiental, sem que com isso se comprometa o custo de construção.

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC às seis soluções construtivas para pavimentos, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a **solução construtiva mais sustentável é a Pav12** – pavimento misto com cofragem metálica colaborante, com tecto falso, isolante e lajeta flutuante –, enquanto que a **solução construtiva menos sustentável é a Pav13** – pavimento de estrutura descontínua em madeira com tecto falso sem isolante.

No quadro 8.3, apresentam-se as soluções construtivas ordenadas por ordem decrescente de sustentabilidade.

Como se pode verificar nos resultados obtidos, a **aplicação do tecto falso**, com as características referidas anteriormente, melhora significativamente o isolamento térmico das tecnologias construtivas, sem comprometer o desempenho ambiental e o custo de construção. A melhoria é tanto maior quanto menor for o isolamento térmico da solução sem tecto falso. Por exemplo, no caso das lajes com cofragem metálica colaborante, o valor do coeficiente de transmissão térmica na solução com tecto falso é cerca de 20% do valor da solução sem tecto falso. As melhorias verificadas ao nível do isolamento sonoro a sons de condução área, após a introdução do tecto falso, rondam em média os 2 dB.

A **aplicação da lajeta flutuante**, com as características referidas anteriormente, traduz-se numa melhoria significativa – como era de esperar – ao nível do isolamento sonoro a sons de percussão, sem que com isso seja necessário aumentar desmesuradamente o investimento inicial. O isolamento térmico das tecnologias construtivas também melhora, em grande parte devido à baixa condutibilidade térmica do elemento resiliente – aglomerado negro de cortiça. Em contrapartida, a aplicação da lajeta flutuante implica – principalmente nas tecnologias construtivas de menor massa – uma diminuição significativa do desempenho ambiental. A título de exemplo, a aplicação de lajeta flutuante no pavimento com cofragem metálica colaborante traduz-se num incremento da massa e da energia primária incorporada em cerca de 25% e 55%, respectivamente.

A opção pelos **pavimentos de estrutura contínua de betão armado**, em detrimento das lajes de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos de cofragem, não apresenta qualquer vantagem, tendo

em conta os parâmetros analisados. Neste caso, a inexistência de elementos vazados agrava significativamente a sua massa e diminui acentuadamente o isolamento térmico.

Quadro 8.3 – Soluções construtivas para pavimentos, ordenadas por ordem decrescente de sustentabilidade

Posição	Solução construtiva	
1º	Pav12	**Mais sustentável**
2º	Pav14	↑
3º	Pav2	
4º	Pav16	
5º	Pav11	
6º	Pav15	
7º	Pav3	
8º	Pav1	
9º	Pav5	
10º	Pav6	
11º	Pav8	
12º	Pav4	
13º	Pav9	
14º	Pav10	
15º	Pav7	
16º	Pav13	**Menos sustentável**

Os **pavimentos constituídos por painéis prefabricados de betão pré-esforçado** apresentam como única vantagem, relativamente à solução de referência, a menor quantidade – menos cerca de 25% – de energia primária incorporada. A maior desvantagem reside ao nível do custo de construção, que é superior em cerca de 220%. A aplicação desta tecnologia em edifícios de habitação não se traduz em qualquer vantagem. Este tipo de pavimento será mais adequado a edifícios com grandes vãos ou elevadas sobrecargas, como por exemplo, os edifícios industriais. Um parâmetro que não foi analisado neste estudo, e que poderá justificar a opção por esta

tecnologia, é o tempo necessário à construção, que neste caso é menor, pelos motivos apontados anteriormente.

Os **pavimentos mistos com cofragem metálica colaborante apresentam** como principal desvantagem o seu fraco isolamento térmico, que é justificado pela elevada condutibilidade térmica dos materiais constituintes. A sua massa e PEC são significativamente inferiores – em cerca de 50% e 28%, respectivamente, tornando o seu desempenho ambiental melhor do que o da solução de referência. Numa situação em que não seja necessário cumprir a exigência de isolamento térmico, esta tecnologia torna-se mais sustentável do que a de referência. Sempre que necessário, o seu baixo isolamento térmico pode ser facilmente corrigido pela introdução de revestimentos isolantes que, como se pode observar no quadro 8.2, acabam por a converter na tecnologia construtiva mais sustentável, atendendo aos parâmetros considerados. Outra desvantagem reside ao nível do custo de construção que, por ser praticamente o dobro do da solução de referência, constitui uma barreira à sua implementação.

Os **pavimentos de estrutura descontínua em madeira** são, dentro da amostra analisada, os que apresentam melhor desempenho ambiental – a sua massa e energia primária chegam a ser apenas cerca de 15% e 28%, respectivamente, dos valores associados à solução de referência. A solução mais sustentável só não pertence a este tipo de tecnologia devido à necessidade de se realizar um investimento inicial muito significativo, que é, numa das soluções, superior em cerca de 400% relativamente à solução de referência. Dentro desta tecnologia, a solução mais sustentável é a que apresenta tecto falso, desligado rigidamente dos elementos de suporte, com isolante no tardoz – Pav14.

Em conclusão, a **tecnologia construtiva convencional** apresenta, no universo analisado, um bom posicionamento – o Pav2 encontra-se no grupo das três soluções mais sustentáveis –, apresentando como principal vantagem o facto de apresentar o menor custo de construção. No entanto, é preciso não esquecer que existem outros parâmetros que não foram abordados neste estudo – por exemplo o potencial de reutilização –, que poderiam comprometer a sustentabilidade desta solução.